Traitement du signal et Apprentissage profond ; applications industrielles

Thomas COURTAT

thomas.courtat@thalesgroup.com

Master MVA 2023

Antennes et radars

Antenne radioélectrique

Dispositif physique qui transforme un courant ou une tension en un champs électromagnétique ($\vec{e}(x,t), \vec{b}(x,t)$, x la position, t le temps.)

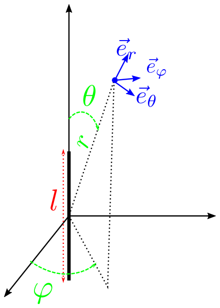
Antenne radioélectrique

Dispositif physique qui transforme un courant ou une tension en un champs électromagnétique ($\vec{e}(x,t), \vec{b}(x,t)$, x la position, t le temps.)

Exemple: doublet élémentaire, pour
$r \gg l \gg \lambda = \dfrac{c}{f}$ alimenté par $I(t) = I_0 \cos 2\pi f t$

$$\vec{e}(r,\theta) = \mathfrak{Re}\left(\frac{-\imath}{2\epsilon c}\frac{l}{\lambda}\frac{\sin\theta}{r} I_0 e^{2\pi\imath(ft-\frac{r}{\lambda})}\right)\vec{e}_\theta$$

et $\vec{b}(r,\theta) = \frac{1}{c}\langle \vec{e}(r,\theta), \vec{e}_\theta\rangle \vec{e}_\varphi$
- $c =$ vitesse de la lumière,
- ϵ permitivité diélectrique,
- $\mu =$ perméabilité magnétique



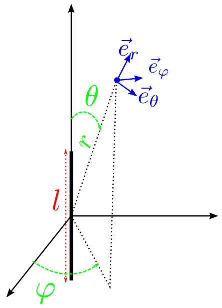
Antenne radioélectrique

Dispositif physique qui transforme un courant ou une tension en un champs électromagnétique ($\vec{e}(x,t), \vec{b}(x,t)$, x la position, t le temps.)

Exemple: doublet élémentaire, pour
$r \gg l \gg \lambda = \frac{c}{f}$ alimenté par $I(t) = I_0 \cos 2\pi f t$

$$\vec{e}(r,\theta) = \mathfrak{Re}\left(\frac{-\imath}{2\epsilon c}\frac{l}{\lambda}\frac{\sin\theta}{r} I_0 e^{2\pi\imath(ft-\frac{r}{\lambda})}\right)\vec{e}_\theta$$

et $\vec{b}(r,\theta) = \frac{1}{c}\langle \vec{e}(r,\theta), \vec{e}_\theta\rangle \vec{e}_\varphi$
- $c =$ vitesse de la lumière,
- ϵ permitivité diélectrique,
- $\mu =$ perméabilité magnétique



Réciprocité: un champs à proximité d'une antenne produit un courant sur celle-ci.

Puissance

La puissance électrique alimentant l'antenne est convertie en puissance électromagnétique.

Puissance

La puissance électrique alimentant l'antenne est convertie en puissance électromagnétique.

Vecteur de Poynting $\vec{\Pi} = \frac{1}{\mu}\vec{e} \times \vec{b}$ tel que la puissance transmise à une surface S vaille $P(S) = \int_S \vec{\Pi}(s)\vec{n}_S(s)ds$, $\vec{n}_S(s)$ la normale à S en s.

Puissance

La puissance électrique alimentant l'antenne est convertie en puissance électromagnétique.

Vecteur de Poynting $\vec{\Pi} = \frac{1}{\mu}\vec{e} \times \vec{b}$ tel que la puissance transmise à une surface S vaille $P(S) = \int_S \vec{\Pi}(s)\vec{n}_S(s)ds$, $\vec{n}_S(s)$ la normale à S en s.

On se souvient des relations dans le vide $\dfrac{|e|}{|b|} = c$ et $\mu\epsilon c^2 = 1$

$\Rightarrow |\Pi| = \epsilon c|e|^2$

Puissance

La puissance électrique alimentant l'antenne est convertie en puissance électromagnétique.

Vecteur de Poynting $\vec{\Pi} = \frac{1}{\mu}\vec{e} \times \vec{b}$ tel que la puissance transmise à une surface S vaille $P(S) = \int_S \vec{\Pi}(s)\vec{n}_S(s)ds$, $\vec{n}_S(s)$ la normale à S en s.

On se souvient des relations dans le vide $\dfrac{|e|}{|b|} = c$ et $\mu\epsilon c^2 = 1$
$\Rightarrow |\Pi| = \epsilon c|e|^2$

Antenne isotrope sans perte : $P(r, \cancel{\theta}, \cancel{\varphi}) = \frac{P_0}{4\pi r^2}$, P_0 la puissance électrique fournie à l'antenne.

Diagramme de rayonnement

L'antenne isotrope n'est pas réalisable en pratique, c'est un point de comparaison idéal. Les antennes sont directives

Diagramme de rayonnement

L'antenne isotrope n'est pas réalisable en pratique, c'est un point de comparaison idéal. Les antennes sont directives

$$G(\cancel{r}, \theta, \varphi) = \frac{\left(\frac{P(r,\theta,\varphi)}{S}\right)_{\text{Antenne étudiée alimentée par une puissance} P_0}}{\left(\frac{P(r,\theta,\varphi)}{S}\right)_{\text{Antenne isotrope alimentée par une puissance} P_0}}$$

Diagramme de rayonnement

L'antenne isotrope n'est pas réalisable en pratique, c'est un point de comparaison idéal. Les antennes sont directives

$$G(\cancel{r}, \theta, \varphi) = \frac{\left(\frac{P(r,\theta,\varphi)}{S}\right)_{\text{Antenne étudiée alimentée par une puissance} P_0}}{\left(\frac{P(r,\theta,\varphi)}{S}\right)_{\text{Antenne isotrope alimentée par une puissance} P_0}}$$

Exemple: doublet élémentaire:
$P(r, \theta, \varphi) = \epsilon c |\vec{e}(r, \theta, \varphi)|^2 = \frac{1}{4\epsilon c} \frac{l^2}{\lambda^2} \frac{\sin^2 \theta}{r^2} I_0^2$.
On calcule la puissance de la source électrique en intégrant P sur la sphère de rayon r $\mathcal{S}_r$: $P_0 = \int_{\mathcal{S}_r} P(s) ds = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} P(r, \theta, \varphi) r^2 \sin \theta d\theta d\varphi$
$\Rightarrow P_0 = \frac{8\pi}{3} \frac{1}{4\epsilon c} \frac{l^2}{\lambda^2} I_0^2$ et

Diagramme de rayonnement

$$G(\cancel{r}, \theta, \cancel{\varphi}) = \frac{\frac{3\sin^2\theta}{8\pi r^2}P_0}{\frac{1}{4\pi r^2}P_0} = \frac{3}{2}\sin^2\theta$$

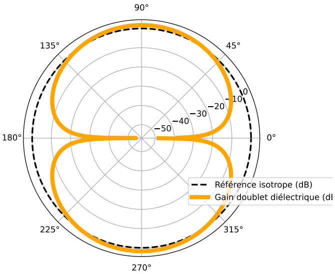


Diagramme de rayonnement

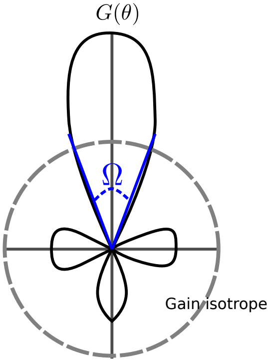
D'une manière générale, le diagramme de rayonnement est composé

- d'un lobe principal d'ouverture Ω
- de lobes secondaires
- de lobes arrière

Diagramme de rayonnement

D'une manière générale, le diagramme de rayonnement est composé

- d'un lobe principal d'ouverture Ω
- de lobes secondaires
- de lobes arrière



On a la règle de dimensionnement (admise) pour une antenne de dimension typique l,

$$\Omega \propto \frac{\lambda}{l}$$

Bilan de puissance

Entre deux antennes e et r écartées de R,

$$P_{\text{reçue en r}} = P_{\text{émise en e}} \cdot \frac{G_e(\text{direction } e \text{ vers } r)}{4\pi r^2} S_r$$

avec S_r la surface équivalente du récepteur = surface physique corrigée pour prendre en compte les pertes.

Bilan de puissance

Entre deux antennes e et r écartées de R,

$$P_{\text{reçue en r}} = P_{\text{émise en e}} \cdot \frac{G_e(\text{direction } e \text{ vers } r)}{4\pi r^2} S_r$$

avec S_r la surface équivalente du récepteur = surface physique corrigée pour prendre en compte les pertes.

On a la relation (admise) $S_r(\theta, \varphi) = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r(\theta, \varphi)$.

Bilan de puissance

Entre deux antennes e et r écartées de R,

$$P_{\text{reçue en r}} = P_{\text{émise en e}} \cdot \frac{G_e(\text{direction } e \text{ vers } r)}{4\pi r^2} S_r$$

avec S_r la surface équivalente du récepteur = surface physique corrigée pour prendre en compte les pertes.

On a la relation (admise) $S_r(\theta, \varphi) = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r(\theta, \varphi)$.

Ce qui donne la relation de Friis :

$$P_{\text{reçue en r}} = P_{\text{émise en } e} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \cdot G_e(\text{direction } e \text{ vers } r) G_r(\text{direction } r \text{ vers } e)$$

Radars

⇒ RAdio Detection And Ranging.

Système qui émet des signaux EM et analyse le signal retour pour inférer:
- l'existence,
- la distance,
- la direction,
- et la vitesses de potentielles cibles.

Principe physique : *rétrodiffusion* d'une onde EM par les cibles.

Radar monostatique: antenne émission = antenne réception

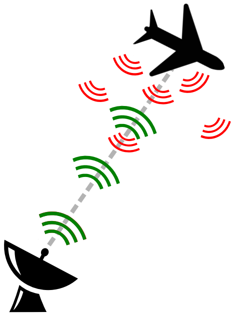
Radars

⇒ RAdio Detection And Ranging.

Système qui émet des signaux EM et analyse le signal retour pour inférer:
- l'existence,
- la distance,
- la direction,
- et la vitesses de potentielles cibles.

Principe physique : *rétrodiffusion* d'une onde EM par les cibles.

Radar monostatique: antenne émission = antenne réception



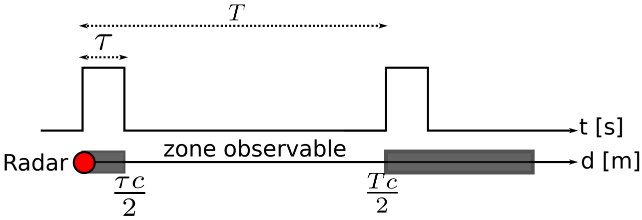
Radars: mesure de distance

Signal émis = suite d'impulsions de fréquence f, de durée τ, répétées tous les T (T= Période de Répetition des Impulsions).

Si cible à une distance r, temps retour:

$$\Delta t = \frac{2r}{c}$$

- zone d'ombre: $r < 0.5\tau c$
- distance maximale: $r < 0.5Tc$



Typiquement, $f \simeq 1 - 10\text{GHz}$, $\tau \simeq 1\mu\text{s}$, $\frac{1}{T} \simeq 1 - 500\text{kHz}$.

Choix de la fréquence par rapport à la dimension des cibles

Radars: bilan de puissance

Bilan similaire à l'équation de Friis.

Radars: bilan de puissance

Bilan similaire à l'équation de Friis.

Pour un radar monostatique et une cible à une distance r:

$$P(\text{retour}) = P(\text{émise}) \cdot \frac{G(\text{direction cible})}{4\pi r^2} \cdot S_e \cdot \frac{1}{4\pi r^2} \cdot \frac{G(\text{direction cible})\lambda^2}{4\pi}$$

avec S_e la surface équivalente de la cible.

Radars: bilan de puissance

Bilan similaire à l'équation de Friis.

Pour un radar monostatique et une cible à une distance r:

$$P(\text{retour}) = P(\text{émise}) \cdot \frac{G(\text{direction cible})}{4\pi r^2} \cdot S_e \cdot \frac{1}{4\pi r^2} \cdot \frac{G(\text{direction cible})\lambda^2}{4\pi}$$

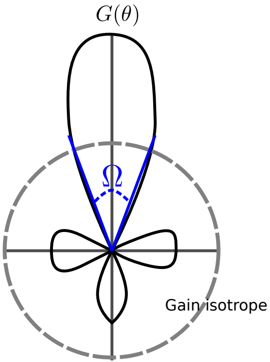
avec S_e la surface équivalente de la cible.

On retiendra $P(\text{retour}) \propto \frac{P(\text{émise})}{r^4}$

Radars: mesure de la direction

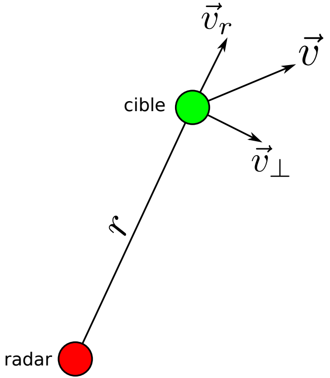
En utilisant une antenne de lobe principal petit et en balayant l'espace:

- balayage mécanique
- balayage électronique (on en dira un peu plus plus tard)



Radars: mesure de la vitesse

Effet Doppler: une antenne B émet un signal sinusoïdal de fréquence f:
$s_B(t) = e^{2\pi \imath f t}$.
B se déplace par rapport à un récepteur A: $d_{A,B}(t) = d_0 + v_r t$.



Le signal reçu en A s'écrit
$s_A(t) = s_B(t - \frac{d(t)}{c})$ soit

$$s_A(t) = e^{2\pi \imath f (1 - \frac{v_r}{c}) t + \varphi_0}$$

$\Rightarrow$ Fréquence apparente: $f \to f \pm f \frac{|v_r|}{c}$

Radars: mesure de la vitesse

Pour un radar, émission, écho, réception, la distance est doublée:

$\Rightarrow$ Fréquence apparente: $f \to f \pm \delta f$, $\delta f = 2f\frac{|v_r|}{c}$

Radars: mesure de la vitesse

Pour un radar, émission, écho, réception, la distance est doublée:
$\Rightarrow$ Fréquence apparente: $f \to f \pm \delta f$, $\delta f = 2f\frac{|v_r|}{c}$

Variation de phase entre deux échos: $\Delta\varphi = \delta f T = 2\frac{v_r f T}{c}$
Vitesse maximale : $\Delta\varphi = 2\pi \Rightarrow v_r = \frac{\pi c}{fT}$

Radars: mesure de la vitesse

Pour un radar, émission, écho, réception, la distance est doublée:
$\Rightarrow$ Fréquence apparente: $f \to f \pm \delta f$, $\delta f = 2f\frac{|v_r|}{c}$

Variation de phase entre deux échos: $\Delta\varphi = \delta f T = 2\frac{v_r f T}{c}$
Vitesse maximale : $\Delta\varphi = 2\pi \Rightarrow v_r = \frac{\pi c}{fT}$

T	f	v_r	δ_f	$\delta_f T$
10μs	1 GHz	100 km/h	185 Hz	0.0018
1ms	10 GHz	1000 km/h	18 kHz	18

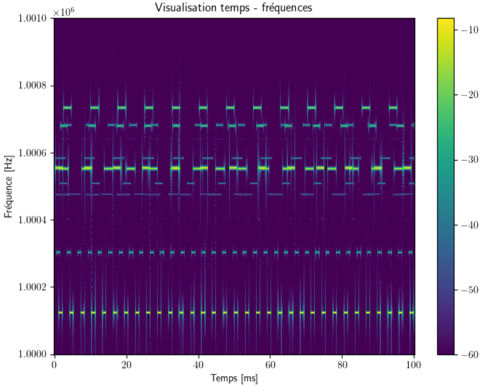
Conception d'un radar

- Fréquence: dimension des cibles, ouverture, dimension du radar.
- PRI: distance typique des cibles recherchées
- Longueur d'impulsion: probabilité de détection sous contrainte de puissance
- Discrétion: limiter la puissance émise ou la diluer (sauts de fréquence)
- Robustesse: Différentes valeurs de PRI alternées.
- Radars multi-modes: peuvent se reconfigurer pour différents types de situation:
- et de nombreuses contraintes mécaniques et électroniques

Guerre électronique

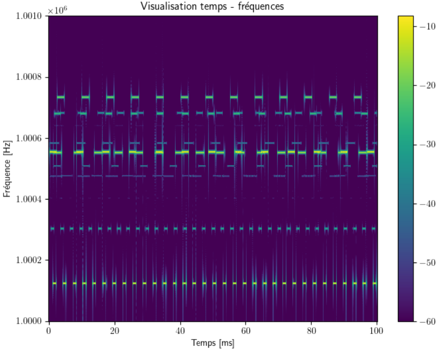
Rétroingénrie passive d'une scène électromagnétique.
A partir d'un enregistrement, inférer les éléments constituant la scène.

SIGnal INTelligence = ELectronic INTelligence ∪ COMmunications INTelligence



Guerre électronique

- Détecter du signal
- Caractérisation bas niveau du signal
- Désentrelacer / séparer plusieurs signaux
- Regrouper des morceaux de signaux cohérents
- Caractérisation haut niveau du Signal
- Identifier les signaux
- Pister les signaux dans le temps
- Mettre en relation les différents signaux issus de différents capteurs



Localisation passive par réseau d'antennes

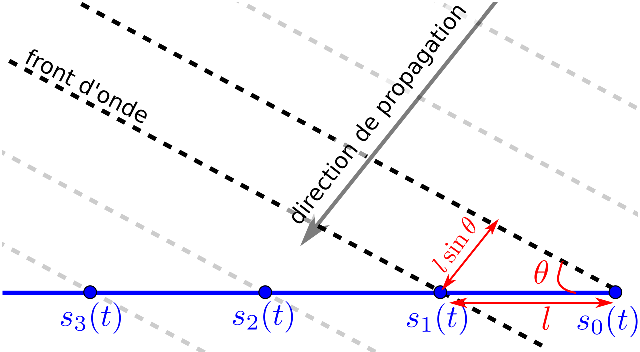
Objectif : détecter la direction d'arrivée d'un signal.

Méthode : mettre en place un réseau de plusieurs capteurs et analyser les différences de phase des signaux sur les différents capteur pour inférer la direction d'arrivée.

Localisation passive par réseau d'antennes

Réseau de capteur = N antennes s_i alignées, régulièrement espacées de l.
Une onde x, de fréquence f, $s(t) = e^{2\pi\imath f t}$ arrive sur le réseau avec un angle θ_0.

$$\forall i, s_i(t) = s_0(t) \cdot e^{-2\pi\imath \frac{fli \sin\theta_0}{c}}$$



Localisation passive par réseau d'antennes

On note $S(t) = \begin{pmatrix} s_0(t) \\ \cdots \\ s_{N-1}(t) \end{pmatrix}$ et le *steering vector*: $A(\theta) = \begin{pmatrix} 1 \\ e^{-2\pi\imath\frac{fl\sin\theta}{c}} \\ \cdots \\ e^{-2\pi\imath\frac{fl(N-1)\sin\theta}{c}} \end{pmatrix}$.

Localisation passive par réseau d'antennes

On note $S(t) = \begin{pmatrix} s_0(t) \\ \cdots \\ s_{N-1}(t) \end{pmatrix}$ et le *steering vector*: $A(\theta) = \begin{pmatrix} 1 \\ e^{-2\pi\imath\frac{fl\sin\theta}{c}} \\ \cdots \\ e^{-2\pi\imath\frac{fl(N-1)\sin\theta}{c}} \end{pmatrix}$.

On a $S(t) = s(t)A(\theta_0)$

Localisation passive par réseau d'antennes

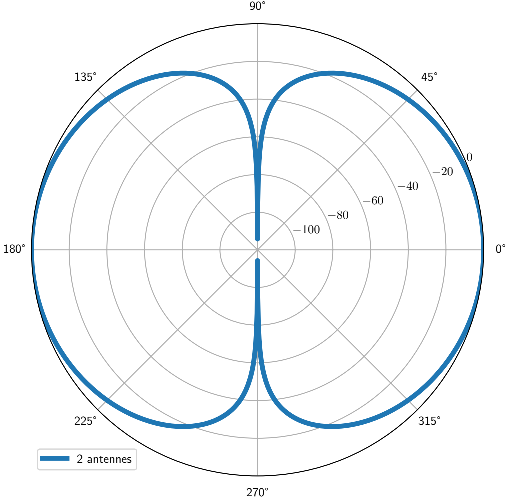
On note $S(t) = \begin{pmatrix} s_0(t) \\ \cdots \\ s_{N-1}(t) \end{pmatrix}$ et le *steering vector*: $A(\theta) = \begin{pmatrix} 1 \\ e^{-2\pi\imath \frac{fl\sin\theta}{c}} \\ \cdots \\ e^{-2\pi\imath \frac{fl(N-1)\sin\theta}{c}} \end{pmatrix}$.

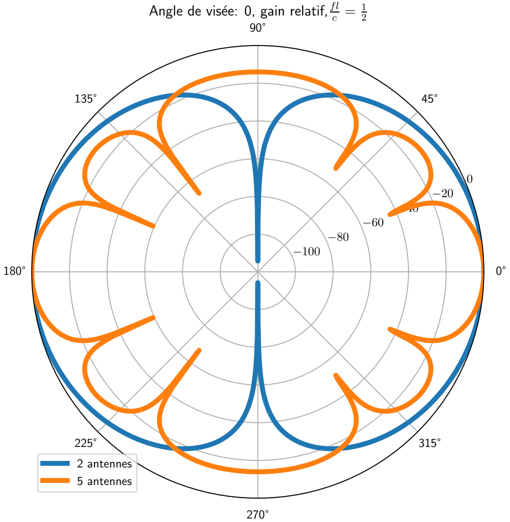
On a $S(t) = s(t)A(\theta_0)$

$\Rightarrow \int |\langle A(\theta)\,,\, S(t)\rangle|^2\, dt$ est maximal pour $\theta = \theta_0$

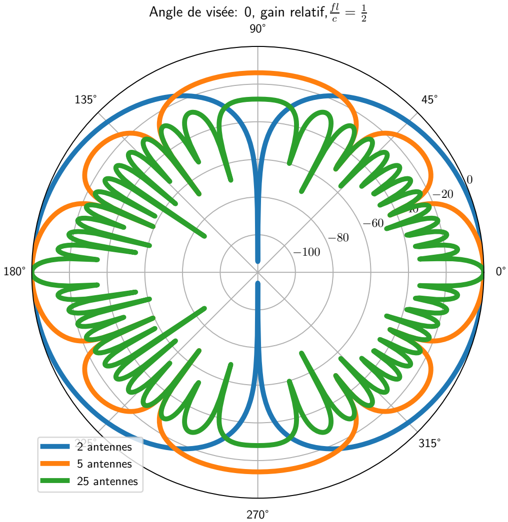
Localisation passive par réseau d’antennes

Angle de visée: 0, gain relatif, $\frac{fl}{c} = \frac{1}{2}$

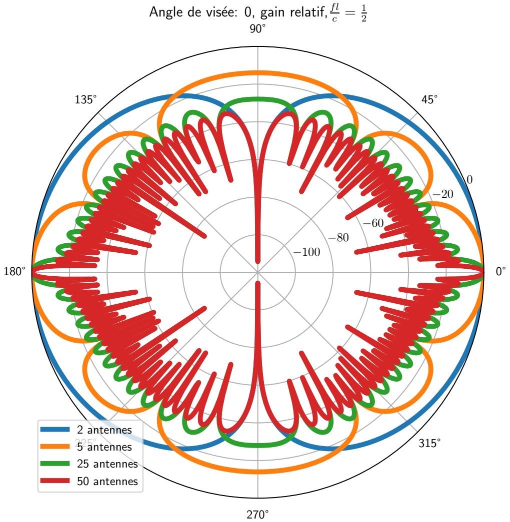



Angle de visée: 0, gain relatif, $\frac{fl}{c} = \frac{1}{2}$
90°
45°
0°
315°
270°
225°
180°
135°
0
−20
−60
−80
−100
2 antennes
5 antennes

Localisation passive par réseau d'antennes



Localisation passive par réseau d'antennes



Localisation passive par réseau d'antennes